

РАСЧЁТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА И АРМАТУРЫ

С.Б. Шматков¹, В.В. Штурмин²

¹ ООО «Спецвысотстройпроект», г. Челябинск

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Описан способ расчёта стволов железобетонных дымовых труб с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры. Расчётная схема принимается в виде защемлённого в основании консольного стержня. Изгибающие моменты определяются из расчёта по деформированной схеме (геометрическая нелинейность) с учётом нелинейности деформирования бетона и арматуры (физическая нелинейность). Постановка задачи, принятые физические зависимости полностью соответствуют требованиям действующих норм проектирования, что даёт принципиальную возможность для внедрения разработанного способа расчёта и компьютерной программы в проектную практику.

Приведены примеры расчётов в сравнении с существующей ныне методикой расчёта дымовых труб, которые выявили значительные погрешности существующей методики и показали перспективность применения предлагаемого способа расчёта.

Ключевые слова: дымовые трубы, физическая нелинейность, геометрическая нелинейность, диаграммы деформирования.

Введение

В нормах проектирования дымовых труб [1, 2] в качестве расчётной схемы принимается защемлённый в основании консольный стержень кольцевого сечения. При этом изгибающие моменты определяются из расчёта по деформированной схеме (геометрическая нелинейность), а в железобетонных трубах кроме того учитываются образование трещин и снижение жёсткостных характеристик ствола трубы по сравнению с исходными (физическая нелинейность). Методика расчёта стволов дымовых труб в такой постановке была разработана ещё в середине прошлого века В.И. Мурашёвым [3] и легла в основу ряда конструктивных документов [2, 4, 5]. Поскольку методика В.И. Мурашёва ориентирована на расчёт «вручную», она использует упрощённые схемы работы сечений. В частности, после образования

трещин не учитывается работа растянутого бетона, распределение напряжений в растянутой арматуре и сжатом бетоне принимается постоянным в пределах поперечного сечения ствола трубы.

Оставаясь в рамках требований нормативных документов по расчёту дымовых труб, расчётная модель может быть уточнена за счёт введения нелинейных диаграмм деформирования бетона и арматуры, рекомендованных сводом правил [6] (рис. 1).

Общие уравнения для расчёта железобетонного кольцевого сечения с использованием нелинейных диаграмм деформирования бетона и арматуры применительно к стержневым элементам были предложены С.Н. Карпенко [7]. В.И. Соломин [8], с использованием вариационно-разностного подхода, представил уравнения и алгоритм расчёта железобетонных стволов дымовых труб на основе нелинейной деформационной модели.

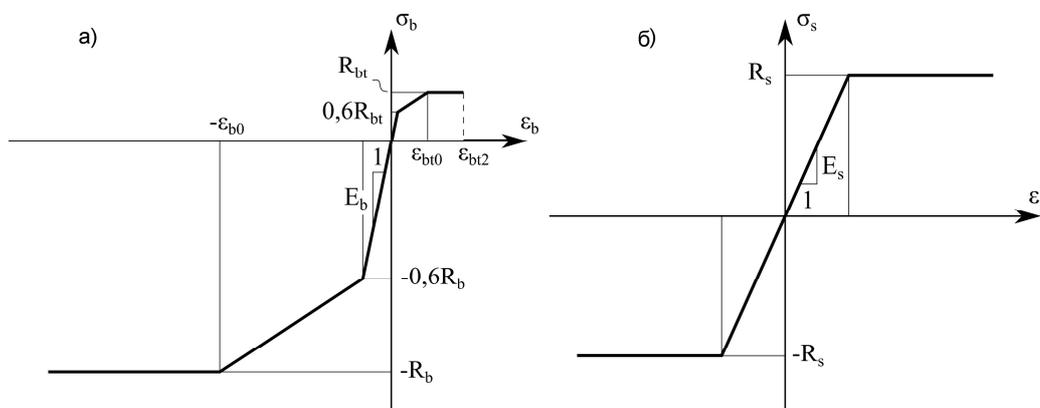


Рис. 1. Диаграммы деформирования бетона (а) и арматуры (б)

Теория расчета строительных конструкций

В данной статье показан способ и результаты расчётов стволов железобетонных дымовых труб с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры. Способ расчёта предполагает компьютерную реализацию и использование дискретных расчётных моделей сечения и ствола трубы.

Алгоритм «Сечение»

Кольцевое сечение разбивается по радиусу и окружности на n_b фрагментов бетона и n_s фрагментов арматуры (рис. 2).

В пределах каждого участка напряжения предполагаются равномерно распределёнными. В качестве обобщённых усилий принимаются продольная сила N и изгибающий момент M_x . В качестве обобщённых деформаций – кривизна α_x и относительная деформация ε_0 геометрической оси стержня. Связь между напряжениями и обобщёнными усилиями устанавливается уравнениями статической эквивалентности:

$$N = \sum_{i=1}^{n_b} \sigma_{b,i} \Delta A_{b,i} + \sum_{j=1}^{n_s} \sigma_{s,j} \Delta A_{s,j}, \quad (1)$$

$$M_x = \sum_{i=1}^{n_b} \sigma_{b,i} y_{b,i} \Delta A_{b,i} + \sum_{j=1}^{n_s} \sigma_{s,j} y_{s,j} \Delta A_{s,j}, \quad (2)$$

где $\sigma_{b,i}$, $\sigma_{s,j}$ – напряжения соответственно в i -м фрагменте бетона и j -м фрагменте арматуры;

$\Delta A_{b,i}$, $\Delta A_{s,j}$ – площадь соответственно i -го фрагмента бетона и j -го фрагмента арматуры;

$y_{b,i}$, $y_{s,j}$ – ордината соответственно i -го фрагмента бетона и j -го фрагмента арматуры.

Распределение деформаций принимается, считая справедливой гипотезу плоских сечений:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + y\alpha_x, \quad (3)$$

где ε – относительная деформация волокон с координатой y .

Добавляя к (1)–(3) зависимости

$$\sigma_b = \sigma_b(\varepsilon) \text{ и } \sigma_s = \sigma_s(\varepsilon), \quad (4)$$

вытекающие из принятых диаграмм деформирования бетона и арматуры, получаем замкнутую систему уравнений для расчёта сечения. При этом могут быть решены две задачи:

– при заданных ε_0 и α_x найти соответствующие значения N и M_x ;

– при заданных N и M_x найти соответствующие значения ε_0 и α_x .

Первая задача решается последовательным применением формул (3), (4), (1) и (2).

Вторая задача решается путём многократного решения первой задачи с целью подбора таких ε_0 и α_x , при которых уравнения (1), (2) выполняются с необходимой точностью.

Алгоритмы решения этих задач в совокупности образуют расчётную модель железобетонного сечения.

Алгоритм «Ствол»

Расчёт ствола выполняется по деформированной схеме. При известном изгибе оси ствола усилия в нём определяются методом сечений, так как задача является статически определимой. Поскольку изгиб оси ствола зависит в том числе от нелинейных свойств материалов, задача решается путём последовательных приближений с уточнением на каждой итерации горизонтальных перемещений оси стержня и слагаемых изгибающих моментов в каждом сечении от собственного веса вышерасположенной части ствола.

Для численного решения ось ствола разбивается на участки и на границах участков вводятся узлы, в которых будет выполняться расчёт сечений. Нагрузки от собственного веса и давления ветра на участках прикладываются в соответ-

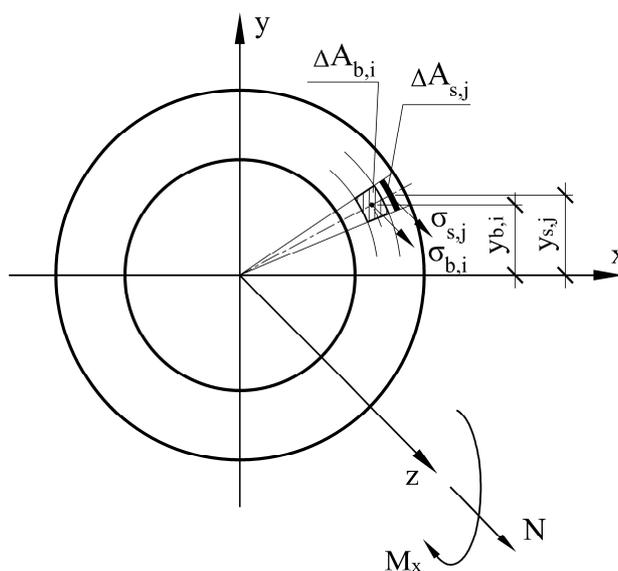


Рис. 2. Схема сечения с изображением фрагментов бетона и арматуры

вующих узлах. Расчётная схема ствола трубы изображена на рис. 3.

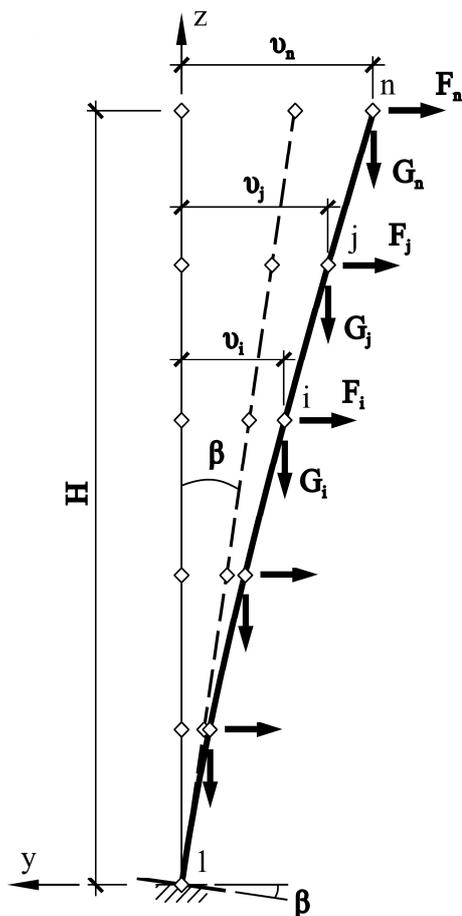


Рис. 3. Расчётная схема ствола железобетонной трубы

Изгибающие моменты в каждом сечении вычисляются по формуле:

$$M_{x,i} = M_{x0,i} + \sum_{j=i+1}^n G_j (v_j - v_i), \quad (5)$$

где $M_{x0,i}$ – слагаемое изгибающего момента, вызванное горизонтальными нагрузками.

Второе слагаемое в (5) обусловлено деформируемостью расчётной схемы и определяется путём последовательных приближений. Продольные силы при этом являются неизменными.

При известных изгибающих моментах и продольных силах с помощью алгоритма «Сечение» находятся кривизны $\alpha_{x,i}$ в каждом узле стержня. Далее, пользуясь связью кривизн, углов поворота и перемещений ($\alpha = \theta' = v''$) с учётом граничных условий $v_1 = 0$, $\theta_1 = \beta$, путём последовательного численного интегрирования определяются углы поворота θ_i и перемещения v_i в каждом узле.

Последовательное применение внешнего алгоритма «Ствол» и внутреннего алгоритма «Сече-

ние» завершается при достижении необходимой точности расчёта.

Компьютерная реализация

На языке программирования Python авторами была разработана компьютерная программа, которая прошла тщательное тестирование как на уровнях алгоритмов «Сечение» и «Ствол», так и при их совокупной работе. В качестве таких тестовых примеров использовались задачи, имевшие аналитическое решение. Исследовалось также влияние дискретизации объекта (разбивки сечений на фрагменты и стержня на участки) на результаты расчёта.

Примеры расчётов

В исследовательских целях для условной цилиндрической трубы высотой 60 м была проведена серия расчётов как по существующему [2], так и по предлагаемому методам. Цель – выявить возможные расхождения в получаемых результатах и найти их причину.

Для этого по [2, 9] были определены действующие на трубу расчётные ветровые нагрузки. Затем была произведена серия расчётов для разных уровней ветрового давления. Базовое ветровое давление, определённое для II ветрового района, на каждом из участков умножалось на коэффициент k . Исследовался диапазон $k = 0,5 \dots 2,0$ (50%...200%). Нагрузка от собственного веса оставалась неизменной. Крен трубы принимался равным нулю. Результаты расчётов в виде эпюр приведены на рис. 4–6. Пунктирной линией на рис. 4–6 обозначены уровни образования трещин, т. е. в сечениях ниже данного уровня при расчёте выявлено образование горизонтальных трещин. Различия в уровнях обусловлены, в частности, тем, что при расчёте по существующему методу работа растянутого бетона не учитывается. В качестве критерия трещинообразования при расчёте по предлагаемому способу принято достижение в наиболее растянутом волокне бетона деформации ε_{bt2} (см. рис. 1).

Расчёты показали следующее:

1. При $k = 0,5$ в обоих случаях конструкция работает в линейно-упругой стадии. Однако при этом прогибы и кривизны отличаются, что связано с различными начальными значениями изгибных жёсткостей.

2. При появлении трещин в расчёте по существующему методу наблюдается резкий скачок на эпюре кривизн (до 7–8 раз). Скачок на эпюрах кривизн по предлагаемому способу не столь значительный (увеличение кривизны примерно в 2 раза).

3. При расчёте по существующему методу геометрическая нелинейность проявляется в значительно большей степени, чем по предлагаемому методу. Отсюда вытекают различия в значениях изгибающих моментов при $k > 0,5$.

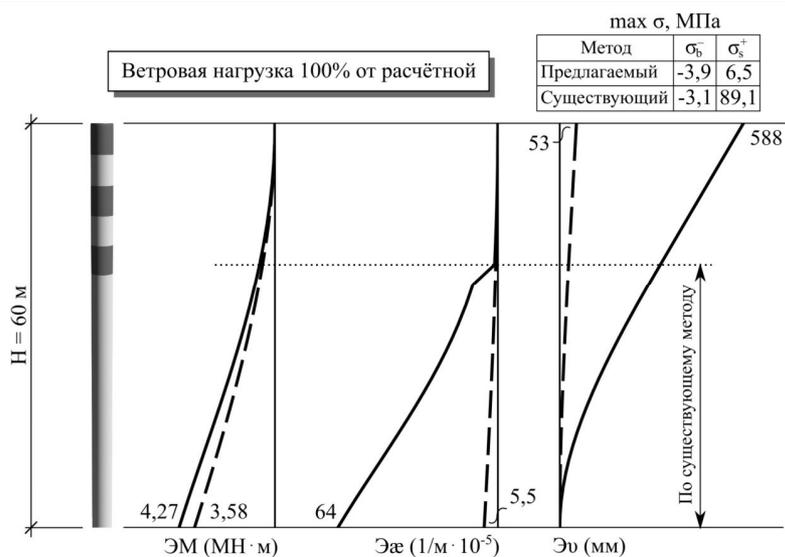


Рис. 4. Результаты расчёта цилиндрической трубы при $k = 0,5$: сплошной линией обозначены эпюры по результатам расчётов по существующему методу, штриховой линией – по предлагаемому методу

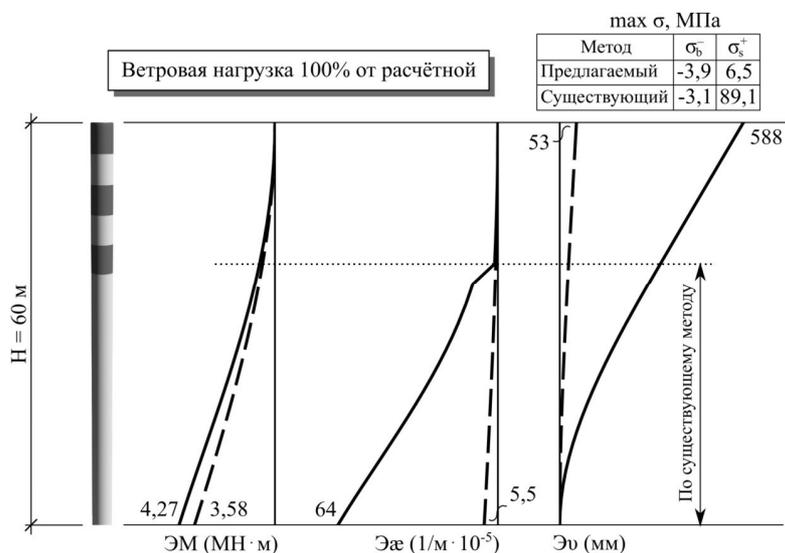


Рис. 5. Результаты расчёта цилиндрической трубы при $k = 1,0$: обозначения см. на рис. 4

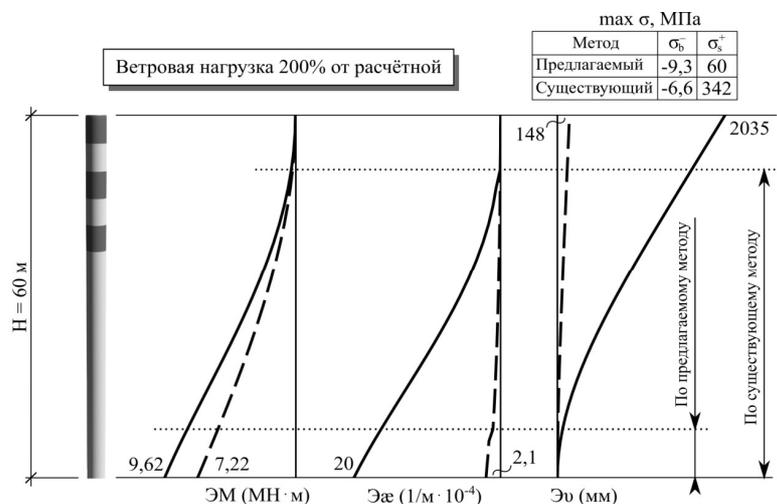


Рис. 6. Результаты расчёта цилиндрической трубы при $k = 2,0$: обозначения см. на рис. 4

Выводы

Методика расчёта железобетонных дымовых труб, заложенная в нормативных документах [2, 4, 5], далека от совершенства. Предлагаемый способ расчёта позволяет освободиться от ряда упрощающих предпосылок, дать более достоверное распределение напряжений в сечении, учесть работу растянутого бетона, точнее описать процессы деформирования.

При дальнейшем развитии этого способа и компьютерной программы несложно учесть проёмы в стволе трубы, неоднородность свойств материалов по высоте трубы и по площади сечений, что представляет большую ценность при проектировании и проверочных расчётах реальных объектов.

Литература

1. СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85. – М.: Минрегион России, 2012. – 101 с.
2. ВСН 286-90. Указания по расчёту железобетонных дымовых труб. – М.: Минмонтажспецстрой СССР, 1990. – 73 с.
3. Мурашёв, В.И. Новый метод расчёта железобетонных дымовых труб / В.И. Мурашёв // Строительная промышленность. – 1951. – № 6. – С. 13–16.
4. Инструкция по проектированию железобетонных дымовых труб. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. – 131 с.

5. ВСН 286-72*. Указания по расчёту железобетонных дымовых труб. – М.: Минмонтажспецстрой СССР, 1973. – 49 с.

6. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Издание официальное. – М.: Минрегион России, 2012. – 155 с.

7. Карпенко, С.Н. Общий метод расчёта железобетонных элементов кольцевого сечения / С.Н. Карпенко // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: материалы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона, 9–14 сентября 2001 г., Москва: в 3 кн. – М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. – Кн. 2. Секционные доклады: Секции I–II. – С. 866–876.

8. Соломин, В.И. К расчёту железобетонной оболочки дымовой трубы / В.И. Соломин // Строительство и экология: теория, практика, инновации: материалы I Междунар. науч.-практ. конф. – Челябинск: Изд-во «ПИРС», 2015. – С. 97–102.

9. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Издание официальное. – М.: Минрегион России, 2011. – 80 с.

Шматков Сергей Борисович, кандидат технических наук, директор ООО «Спецвысотстройпроект» (Челябинск), expert_chel@mail.ru

Штурмин Владимир Валерьевич, аспирант кафедры «Строительная механика», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), vlshurmin@gmail.com

Поступила в редакцию 25 сентября 2015 г.

DOI: 10.14529/build150403

CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE CHIMNEY BASED ON DIAGRAMMS OF CONCRETE AND STEEL DEFORMATION

S.B. Shmatkov¹, expert_chel@mail.ru

V.V. Shturmin², vlshurmin@gmail.com

¹ OOO Spetsvysotstroiproekt, Chelyabinsk, Russian Federation

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The method for calculation of reinforced concrete chimney shafts using the diagrams of concrete and steel deformation is described. The design diagram is accepted in the form of a constrained in the base cantilever bar. Moments of flexion are specified on the basis of calculations according to a deformation scheme (geometrical nonlinearity) taking into consideration nonlinearity of concrete and steel deformation (physical nonlinearity). The problem formulation, traditional physical dependences fully meet the requirements of current design norms, which in its turn offers a possibility in principle to put the developed calculation method and a computer program into practice.

The calculation examples compared to existing methods for calculation of chimneys, which detected significant drawbacks of the existing method and shown prospects of applying the suggested calculation method, are given.

Keywords: chimneys, physical nonlinearity, geometrical nonlinearity, deformation diagrams.

References

1. SP 43.13330.2012. *Sooruzheniya promyshlennykh predpriyatiy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.09.03-85* [SP 43.13330.2012. Construction of industrial enterprises. Revised edition of SNiP 2.09.03-85]. Moscow, Minregion Rossii Publ., 2012. 101 p.
2. VSN 286-90. *Ukazaniya po raschetu zhelezobetonnykh dymovykh trub* [VSN 286-90. Instructions for calculating reinforced concrete chimneys]. Moscow, Minmontazhspeetsstroy USSR Publ., 1990. 73 p.
3. Murashev V.I. [A new method of calculating reinforced concrete chimneys]. *Stroitel'naya promyshlennost'* [The construction industry], 1951, no. 6. pp. 13–16 (in Russ.).
4. *Instruktsiya po proektirovaniyu zhelezobetonnykh dymovykh trub* [Manual for design of reinforced concrete chimneys]. Moscow, State publishing house of literature on construction, architecture and building materials Publ., 1962. 131 p.
5. VSN 286-72*. *Ukazaniya po raschetu zhelezobetonnykh dymovykh trub* [VSN 286-72*. Instructions for calculating reinforced concrete chimneys]. Moscow, Minmontazhspeetsstroy USSR Publ., 1973. 49 p.
6. SP 63.13330.2012. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 52-01-2003. Izdanie ofitsial'noe* [SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Revised edition of SNiP 52-01-2003]. Moscow, Minregion Rossii Publ., 2012. 155 p.
7. Karpenko S.N. [General method of calculation of reinforced concrete elements of annular cross section]. *Beton na rubezhe tret'ego tysyacheletiya: materialy I-y Vseros. konf. po problemam betona i zhelezobeta, 9–14 sentyabrya 2001 g., Moskva* [The concrete at the turn of the third Millennium: materials of the 1st all-Russia. Conf. on the problems of concrete and reinforced concrete, 9-14 September 2001, Moscow]. Moscow, Assotsiatsiya «Zhelezobeton» Publ., 2001, vol. 2, pp. 866–876 (in Russ.).
8. Solomin V.I. [The reinforced concrete shell of the chimney]. *Stroitel'stvo i ekologiya: teoriya, praktika, innovatsii: materialy I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Construction and environment: theory, practice, innovations: materials of the I International scientific-practical conference]. Chelyabinsk, «PIRS» Publ., 2015, pp. 97–102 (in Russ.).
9. SP 20.13330.2011. *Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85*. Izdanie ofitsial'noe* [Load and impact. Actualized edition of SNiP 2.01.07-85*]. Moscow, Minregion Rossii Publ., 2011. 80 p.

Received 25 September 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шматков, С.Б. Испытания платформенных стыков несущих конструкций крупнопанельного жилого дома / С.Б. Шматков, В.В. Штурмин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 17–22. DOI: 10.14529/build150403

FOR CITATION

Shmatkov S.B., Shturmin V.V. Calculation of Reinforced Concrete Chimney Based on Diagrams of Concrete and Steel Deformation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2015, vol. 15, no. 4, pp. 17–22. (in Russ.). DOI: 10.14529/build150403